

吴笑天¹, 丁兴号¹, 吴奎²

(1. 厦门大学 信息科学与技术学院, 厦门 361005; 2. 长春理工大学 理学院, 长春 130022)

摘要: 在雾天条件下捕获的视频或图像将会出现对比度下降、颜色偏移等严重的退化现象, 这将极大的影响图像的主观视觉效果, 大大降低其应用价值。传统的基于暗通道先验信息的全局最优化处理方法虽能获得较好的效果, 但因其算法复杂而不具有实效性。本文将基于暗通道先验信息, 利用双边滤波进行局部优化, 从而获得保持边缘的暗通道图像, 进一步利用该暗通道图像进行传输图像的估计, 并最终复原场景信息。试验结果表明, 此方法可较快的恢复场景信息并能有效保留场景的边缘信息。

关键词: 图像去雾; 暗通道; 快速双边滤波

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870 (2012) 01-0100-05

A Fast Haze Removal Algorithm Using Dark Channel Prior

WU Xiaotian¹, DING Xinghao¹, WU Kui²

(1. School of Information science and technology, Xiamen University, Xiamen 361005;

2. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

Abstract: Images or videos captured under poor weather condition are characterized by poor visibility of scene, low vividness, loss of detail information, and color-shift phenomenon. Using Dark Channel Prior proposed by He^[1], the haze removal algorithm based on the global optimization is computational complexity and quite time-consuming. In this paper, we exploit a new algorithm based on Gauss Bilateral Filter which can obtain an edge-preserving dark channel image. We further utilize this dark channel image to extract the estimation of medium transmission, and finally recover a haze-free image from that. Experiments demonstrate that our algorithm can effectively remove haze from a foggy image while keep edges sharp.

Key words: haze removal; dark channel; fast bilateral filter

随着计算机技术的迅猛发展, 计算机视觉系统已经广泛的应用于社会生活以及国防建设等诸多领域, 比如交通管理、城市安全、海关边防、卫星遥感监测、目标识别等诸多领域。但是, 当前的计算机视觉系统往往对天气条件较为敏感, 在雨雾天气下, 受大气散射加剧的影响, 捕捉的视频数据往往严重退化, 从而极大的影响上述计算机视觉系统的正常运行。因此, 在雨雾天气下对降质图像进行清晰化处理就显得尤为重要。

在去雨雾算法的研究中广泛使用如下的光学模型:

$$O(x, y) = J(x, y) \cdot t(x, y) + A[1 - t(x, y)] \quad (1)$$

在该模型中^[1], $O(x, y)$ 代表观测者接收到的图像(the observed intensity), $J(x, y)$ 代表场景处未经退化的原始场景信息(the scene radiance), $t(x, y)$ 是介质的传输参数(the medium transmission), 它代表了光线没有被散射掉的部分, A 代表大气的背景颜色信息(the global atmospheric light)。

当大气环境是均匀的各向同性的介质时。传输参数可以用如下的表达式表示:

$$t(x, y) = e^{-\beta \cdot d(x, y)} \quad (2)$$

式中的 β 是大气的散射系数, 我们认为 RGB 三

收稿日期: 2011-10-24

作者简介: 吴笑天 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事图象处理及电子技术的研究, E-mail: wuzeping1893@163.com。

通讯作者: 吴奎 (1960-), 男, 高级工程师, 主要从事电子技术及图象处理的研究, E-mail: wukui1960@163.com。

通道具有相同的散射系数值。 $d(x, y)$ 是像素点 (x, y) 处场景的深度信息。

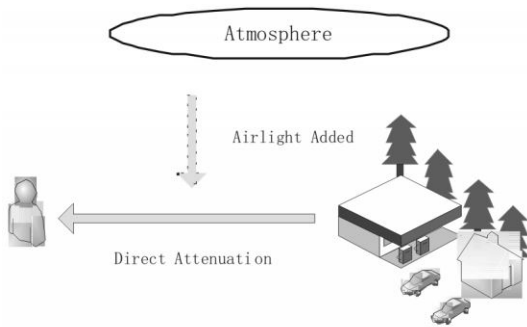


图1 雨雾光学模型示意图

Fig.1 The optical model for haze images

如式(1)所述,去雾算法的实现过程即是由观测值 $O(x, y)$ 还原原始场景信息 $J(x, y)$ 的过程。利用偏振光的方法^[2, 3]、不同天气条件下多张图片的去雾算法^[4, 5]、基于某种附加信息条件下的去雾算法^[6, 7]均可以起到一定的去雾效果,但是工程实践起来相对较为困难。

基于某种先验信息或者假设的单幅图像的去雾还原算法也可以收到很好的去雾效果。以单幅图像去雾算法为例,Tan没有采用去雾的物理模型,而是采用了颜色对比度处理的方法,通过最大化局部差异度的方法实现了单幅图像的去雾算法,可以收到一定的还原效果^[8]。Fattal利用了场景表面与传输参数的局部不相关性的假设前提实现去雾还原算法,但该算法复杂,并且在浓雾区域会因为其假设前提不成立而算法失效^[9]。以上两种算法由于其复杂性原因不能运用于视频图像的实时去雾中。

香港微软亚洲研究院何凯明先生(He)于2009年发表的论文中^[10]提出了暗通道概念,进一步在该文中阐明了暗通道的客观存在性。并首先利用了暗通道概念实现了去雾还原算法。在该算法中,He使用了soft matting中的一种全局优化处理方法,对传输图像进行优化,实现了很好的效果。但是,由于soft matting算法复杂,内存消耗量大,因此满足不了实时性要求。

本文基于暗通道先验信息,利用双边滤波的方法,提出了一种对暗通道图像的优化处理方法。由于暗通道图像与传输图像呈线性关系(参见公式12),从而间接的实现了传输图像的优化过程。双边滤波是一种较为成熟的处理方法,存在快速算法,可并行化。试验结果表明,该方法在极大的降低去雾算法的时间复杂度的同时,仍可实现较好的去雾

效果。

本文后续章节安排如下:第一部分将介绍暗通道先验信息,以及基于暗通道先验信息下的经典的去雾复原算法。第二部分将对双边滤波的暗通道优化算法加以详细介绍。第三部分给出试验结果和分析。第四部分将对本文加以总结。

1 暗通道先验信息及其应用

1.1 暗通道先验信息

He在论文^[10]中提出了一种十分重要但又在自然界普遍存在的先验信息——暗通道先验信息。这一先验信息的提出是基于外景无雾非天空区域图像小块的统计分析而提出来的。暗通道先验信息被定义为:对于大部分外景图像中的局部小图像块中,至少在R、G、B中的某一个空间中,存在灰度值极低的某些点。换言之,在这些外景图像小块中,其灰度的最小值是较低的,趋近于0值。这些灰度值极低的某些点称之为暗点。进一步,我们定义暗通道图像:

$$J^{\text{DarkChannel}}(x, y) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{(x, y) \in (x_0, y_0)} J_c(x, y)) \quad (3)$$

式(3)是根据上文所述的定义而给出的暗通道图像的理论表达式,在进行该操作后,输出的图像称为暗通道图像。通常在实际的计算中,我们将最小值滤波和RGB三通道取最小的过程顺序调换下,这样可以仅进行一次最小值比较和一次最小值滤波。换序操作如下:

$$\min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{(x, y) \in (x_0, y_0)} J_c(x, y)) = \min_{(x, y) \in Q(x_0, y_0)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(x, y)) \quad (4)$$

同时,我们也将R、G、B三色空间下的取最小值的中间结果称之为暗图像,即:

$$J^{\text{DarkChannel}}(x, y) = \min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(x, y) \quad (5)$$

对应的暗通道图像为:

$$J^{\text{DarkChannel}}(x, y) = \min_{(x, y) \in Q(x_0, y_0)} (J^{\text{DarkImage}}(x, y)) \quad (6)$$

对于暗通道图像,我们根据上文所叙述的定义可知:对于外景无雾图像(不包含天空部分),该场景图像的暗通道图像的值整体趋于0(天空的部分除外),即:

$$J^{\text{DarkChannel}}(x, y) = 0 \quad (7)$$

暗通道的存其原因在于暗点,而外景图像中这

些所谓的暗点确实客观存在,比如景物间隙的阴影、彩色物体以及原本呈黑色的物体都为外景彩色图像提供了暗点。He在其论文^[10]中以5000张外景无雾图像(人为去除了天空部分)作为样本,以15*15的小窗进行了统计分析,结果显示86%的暗点值在[0, 15]之间。

但是,当我们对雨雾天气下的降质图像进行暗通道提取的时候,我们发现,其观测图像的暗通道图像不再为0,即:

$$O_{\text{DarkChannel}}(x, y) \neq 0 \quad (8)$$

而带来这一变化的唯一因素即是雨雾模型的第二部分 $A(1-t(x, y))$ 。在下一节中,我们将利用这一特性,实现对介质的传输参数 $t(x, y)$ 进行估计,从而还原出原本的场景信息,实现了雨雾天气下降质图像的还原算法。

1.2 雨雾复原算法

为了利用上文中所述的暗通道先验信息,我们做如下的操作:

首先我们先对式(1)进行如下的调整,等式两端均除以 A (the global atmospheric light),在雨雾天气下的彩色图像中该参数是已知的。 A 的值的获取直观上取彩色图像中雾气最浓重的天空部分。在实际的数值获取中,有的作者采取全局最亮点的处理方法^[8],但是这种方法存在弊端,因为纯白色的墙壁往往具有比天空大气更高的灰度值,在本文中,我们采取了取前0.1%的亮点取平均的方法获得该值。

$$\frac{O(x, y)}{A} = \frac{J(x, y) \cdot t(x, y)}{A} + (1 - t(x, y)) \quad (9)$$

针对式(9),我们使用式(4)的方法先取一次最小值比较,再取一次最小值滤波操作。在本文中,最小值滤波的窗口大小设置为15*15。

通过最小值比较输出以及最小值滤波后的输出结果是:

$$\begin{aligned} \min_{(x, y) \in \Omega(x_0, y_0)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\frac{O(x, y)}{A} \right) \right) &= t(x, y) \cdot \\ \min_{(x, y) \in \Omega(x_0, y_0)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\frac{J(x, y)}{A} \right) \right) &+ \\ (1 - t(x, y)) & \end{aligned} \quad (10)$$

依据上节结论,依照(7)式,

$$\left(\min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\frac{J(x, y)}{A} \right) \right) = 0, \text{ 由此我们得到:}$$

$$t(x, y) = 1 - \omega \cdot \min_{(x, y) \in \Omega(x_0, y_0)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\frac{O(x, y)}{A} \right) \right) \quad (11)$$

一般的,我们实际的图像处理算法中会适当的为远景图像保留少许的雾气,从而使得还原图像不至于因为完全去除雾气而显得没有远近层次感。为此我们引入一个参数 ω , 此处我们取值为0.95。

将式(11)代入式(1)中,解出场景图像,即实现了降质图像的还原:

$$J(x, y) = \frac{O(x, y) - A}{\max(t(x, y), t_0)} + A \quad (12)$$

此处, t_0 是一个固定参数,也是用于为远景图像适度保留一些雾气。He的论文中,将此值设置为定值0.1。

利用式(12)即可以实现雨雾图像的去雾还原算法,如图2(c)所示。还原后远近景交接处留下了白色边缘,这是由于暗通道的估计不精确造成的。去雾算法的优化过程就是围绕着如何对暗通道图像优化或对传输参数图像 $t(x, y)$ 进行的,其目的就是在去除这些极大降低还原图像质量的白色边缘。优化后的传输参数图像记为 $t(x, y)$ 。本文算法出发点即是基于对暗通道图像进行优化,优化后暗通道图像参见图2(d),He的方法则是基于对传输参数图像 $t(x, y)$ 进行优化。

因此最终的还原表达式为:



图2 处理结果

Fig.2 Processing results

$$J(x, y) = \frac{O(x, y) - A}{\max(\hat{t}(x, y), t_0)} + A \quad (14)$$

利用本文的复原方法得到的最终结果参见图2(e)以及图3。

关于暗通道的优化算法或传输参数图像 $t(x, y)$ 的优化算法我们将在第2部分进行深入介绍。



图3 本文方法处理的其他实验结果

Fig.3 More haze removal results. top : input haze images. bottom : recovered haze-free images

2 基于快速双边滤波的暗通道优化方法

正如上文所述,在雨雾算法复原中,传输参数图像 $t(x, y)$ 的复原算法将直接影响图像的主观视觉质量。He在文中应用了soft matting的经典算法,利用 $t(x, y)$ 全局最优化构造代价函数的方法。该方法算法复杂,需要极大的内存空间。虽然能够获得较好的主管视觉质量,但是在实践中并不具有实效性。

对此我们采取了另外一种思路。我们对暗通道图像进行优化,从而间接的优化了传输参数图像 $t(x, y)$ 。算法流程如下:

(1)、首先对式(1)进行R, G, B三个空间的最小值操作:有

$$\min_{c \in \{r, g, b\}} (O(x, y)) = t(x, y) \cdot J^{\text{Dark Image}}(x, y) + A(1 - t(x, y)) \quad (15)$$

(2)、然后我们定义一种操作BiMin,对上式等式两端同时进行BiMin操作:

$$\text{BiMin}(\min_{c \in \{r, g, b\}} (O(x, y))) = t(x, y) \cdot \text{BiMin}(J^{\text{Dark Image}}(x, y)) + A(1 - t(x, y)) \quad (16)$$

其中的BiMin操作定义如下,设输入图像为 $I(x, y)$ 则有:

$$I_{Bi}(x, y) = \frac{\sum_{i, j=-w}^w G_R \cdot G_I \cdot I(x_i, y_j)}{\sum_{i, j=-w}^w G_R \cdot G_I} \quad (17)$$

$$G_R(x, y; x_i, y_j) = \exp\left\{-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{2\sigma_R^2}\right\} \quad (18)$$

$$G_I(x, y; x_i, y_j) = \exp\left\{-\frac{I(x, y) - I(x_i, y_i)}{2\sigma_I^2}\right\} \quad (19)$$

双边滤波本质上是一种保持边缘的中值滤波器。其在平滑图像的同时,可以最大限度的保持图像边缘。对于雨雾图像中,我们观察到所谓的白边现象,恰恰发生在远近景物交替的边缘处。经过了双边滤波过后,远近景物各自内部的像素值趋于平均,同时边缘处的像素值得以保持不动。上式中 $I_{Bi}(x, y)$ 是其双边滤波输出图像。 G_R 是其中的一个高斯核函数,代表了以点 (x, y) 为中心点时,周边点 (x_i, y_j) 的空间相似度, σ_R^2 是其对应的方差参数,本文设为0.5。 G_I 是另一个高斯核函数,代表了以点 (x, y) 为中心点时,周边点 (x_i, y_j) 的像素相似度, σ_I^2 是其对应的方差参数,本文设为0.05。

上述步骤为标准的双边滤波过程,因此,可用较为成熟的双边滤波快速算法^[11]。

再进行双边滤波处理后,我们同样需要进行一次最小值滤波器,与传统意义上的最小值滤波器不同的是,该滤波器的点来源依据上一步 $I_{Bi}(x, y)$ 的像素信息,即:

$$I_{out}(x, y) = \min_{x, y \in \Phi(x_0, y_0)} (I(x, y)) \quad (20)$$

其中, $\Phi(x_0, y_0)$ 是以点 (x_0, y_0) 为中心的邻域 $\Omega(x_0, y_0)$ 的子集,依据如下:

$$\Phi(x_0, y_0) \in \left\{ \Omega(x_0, y_0) \mid \left| I_{Bi}(x, y) - I_{Bi}(x_0, y_0) \right| \leq i_0 \right\} \quad (21)$$

由上式可见, $\Phi(x_0, y_0)$ 中像素点来源在双边滤波的输出图像 $I_{Bi}(x, y)$ 中确定,由 $I_{Bi}(x, y)$ 确定了哪些位置的点可以参与最小值计算。在对源图像 $J^{\text{Dark Image}}(x, y)$ 进行最小值滤波过程中,我们仅让上述标定的点参与运算。经过了BiMin操作过后,与式(9)相同,将有相似的结论:

$$\text{BiMin}(J^{\text{Dark Image}}(x, y)) = 0 \quad (22)$$

因此,将式(22)代入式(16),可以整理出与式(12)相类似的结论,即:

$$\hat{t}(x, y) = 1 - \omega \cdot \text{BiMin}\left(\min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\frac{O(x, y)}{A}\right)\right) \quad (23)$$

(3)、经过步骤(2),得到的传输函数为 $\tilde{t}(x, y)$, 此传输函数则不需要再进行其他优化操作,可直接用来进行雨雾复原,即有:

$$J(x, y) = \frac{O(x, y - A)}{\max(\tilde{t}(x, y), t_0)} + A \quad (24)$$

3 实验结果

将本文的算法用C语言实现,在2.60GHz Pentium(R)Dual-Core CPU条件下,对于一张600*400像素值图像处理时间大约为2s左右,如图2所示,图2(a)为原始降质图像,图2(b)为采用15*15小窗对原降质图像提取出得暗通道图像,图2(c)是依据图(b)的暗通道图像进行的复原结果。结果显示,如果不对暗通道图像进行优化,可以实现粗略的去雾效果,图片远近交界处留有白边,很影响图片主观视觉效果,图(d)为依照本文的方法,优化后的暗通道图像,从图中可见,该暗通道图像边缘保持较好,图(e)是依据图(b)的优化后的暗通道图像复原出场景图像。结果可见,相比图(c),白边消失,其主观视觉质量有了明显提升。图3为本文方法处理的其他的实验结果。在图4中,将我们的方法同Fattal和He的处理结果相对比。实验结果表明我们的方法能够以较少的时间获得同样好的主观视觉质量。

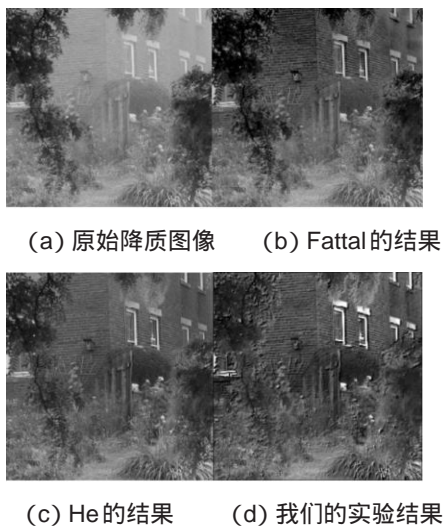


图4 结果对比

Fig.4 Results contrast

4 讨论和结论

本文利用双边滤波的改进方法对暗通道图像进行优化,从而间接实现了传输图像的优化过程。实验结果表明,该优化过程,可以快速复原场景信息,并有效保持场景边缘,获得了较好的主观视觉质量。与现有的去雾算法相同的是本文方法对大面积白色场景的恢复效果不理想。

参考文献

- [1] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather[J]. CVPR 2000:598-605.
- [2] Y Y Schechner, S G Narasimhan, S K Nayar. Instant dehazing of images using polarization [J]. CVPR 2001:325.
- [3] S Shwartz, E Namer, Y Y Schechner. Blind haze separation[J]. CVPR 2006:1984-1991.
- [4] S G Narasimhan, S K Nayar. Chromatic framework for vision in bad weather[J]. CVPR 2000:598-605.
- [5] S G Narasimhan, S K Nayar. Contrast restoration of weather degraded images[J]. PAMI 2003, 25(1): 713-724.
- [6] S G Narasimhan, S K Nayar. Interactive deweathering of an image using physical models [J]. In Workshop on Color and Photometric Algorithms in Computer Vision 2003:1.
- [7] R Tan. Visibility in bad weather from a single image[J]. CVPR 2008:1-8.
- [8] R Fattal. Single image dehazing[J]. SIGGRAPH, 2008:1-9.
- [9] F Porikli. Constant time O(1) bilateral filtering[J]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2008:1-8.
- [10] Kaiming He, Jian Sun, Xiaoou Tang. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior [J]. CVPR 2006.
- [11] J Kopf, B Neubert, B Chen, et al. Deep photo: Model-based photograph enhancement and viewing [J]. SIGGRAPH Asia 2008:1-7.